



УДК 674.8:674.049.2

DOI: 10.17238/0536-1036-2021-2-143-155

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТЕРМОДРЕВЕСНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ
ПРИ БАРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ***Ю.Г. Скурыдин¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-1212-2019](https://orcid.org/0000-0002-1852-2152),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1852-2152>**Е.М. Скурыдина², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-4572-2021](https://orcid.org/0000-0002-1707-8846),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-8846>**Р.Г. Сафин³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>**А.Р. Хабибуллина³, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-5176-2021](https://orcid.org/0000-0002-0762-8816),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0762-8816>*

¹Алтайский государственный университет, просп. Ленина, д. 61, г. Барнаул, Россия, 656049; e-mail: skur@rambler.ru

²Алтайский государственный педагогический университет, ул. Молодежная, д. 55, г. Барнаул, Россия, 656031; e-mail: skudem@rambler.ru

³Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; e-mail: safin@kstu.ru, almira-h@rambler.ru

Аннотация. Направление исследования – формирование представлений о структуре и свойствах композитных материалов, получаемых на основе древесины сосны, а также о процессах, происходящих в структуре древесной ткани. Изучено влияние условий баротермической обработки образцов цельной древесины сосны обыкновенной методом взрывного автогидролиза на плотность, прочностные и гидрофобные характеристики термодревесной композиции, получаемой горячим прессованием. Обработка древесины выполнена в разных условиях фактора жесткости взрывного автогидролиза – при температуре 200 °С и продолжительности процесса от 0,08 до 10 мин. Установлено, что увеличение фактора жесткости гидролиза снижает плотность гидролизованной древесины от 440 до ~350 кг/м³. При выбранных параметрах обработки не происходит фрагментации образцов. Горячее прессование гидролизованной древесины, полученной в условиях незначительной или умеренной жесткости, сопровождается линейным увеличением плотности термодревесного композитного материала от ~440 до 500 кг/м³. Следствием дальнейшего роста жесткости является замедление темпов повышения плотности композитного материала. Условная граница, определяющая достижение максимального количества сшитых межмолекулярных структур в этом материале, соответствует фактору жесткости 3000...4500 мин. Более жесткие условия обработки вызывают интенсификацию процессов термической деструкции. Зависимость гидрофобных характеристик от жесткости условий баротермической обработки носит сложный характер. При факторе жесткости 1000...3000 мин наблюдается точка экстремума, до достижения которой гидрофобные показатели материала ухудшаются. Его водопоглощение возрастает от 50 до 130 %, а разбухание – от 15 до 54 %. После достижения точки экстремума гидрофобные показатели значительно улучшаются. Водопоглощение снижается до ~20 %, разбухание – до ~10 %. Мягкие условия гидролиза не приводят к получению материала со стабильно высокими гидрофобными показателями. Обра-

зующихся сшитых структур недостаточно для формирования прочной и водостойкой композиции, вследствие чего ухудшаются гидрофобные характеристики. Возрастание жесткости гидролиза увеличивает количество активных компонентов. Образующиеся при прессовании дополнительные межмолекулярные связи улучшают гидрофобные характеристики. Полученные результаты могут быть использованы при создании моделей процессов, происходящих в структуре лигноцеллюлозного вещества при взрывном автогидролизе и получении композитных материалов, при определении оптимальных параметров баротермической обработки для изготовления композитных материалов с заданными физико-механическими характеристиками. Баротермическая обработка цельной древесины сосны методом взрывного автогидролиза способствует появлению в структуре древесной ткани химически активных компонентов, на количество которых влияет жесткость условий обработки. Свойства получаемого термодревесного композитного материала находятся в зависимости от условий процесса.

Для цитирования: Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., Сафин Р.Г., Хабибуллина А.Р. Физико-механические характеристики термодревесной композиции из древесины сосны при баротермической обработке // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 143–155. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-143-155

Ключевые слова: древесина, сосна, взрывной автогидролиз, баротермическая обработка, композитный материал, термодревесная композиция, водопоглощение, разбухание по толщине, плотность, прочность.

Введение

Сосна занимает одну из лидирующих позиций среди видов, произрастающих в лесах Западной Сибири: площадь ее ареала – более 38 млн га [17]. Несмотря на то, что древесина сосны в настоящее время используется достаточно широко – прежде всего в строительстве и целлюлозно-бумажном производстве, а также в производстве мебели – потенциал этого ресурса остается по-прежнему значительным. Большинство предлагаемых сегодня методов повышения защищенности цельной древесины от проникновения влаги предусматривают нанесение защитных покрытий, препятствующих попаданию воды в межволоконное пространство, – лакокрасочных, пленочных и комбинированных [8, 18]. В целом это приводит к получению требуемого результата, но сопряжено с большими трудозатратами, расходом материальных ресурсов и, как правило, не улучшает иных характеристик материала, например не увеличивает его прочности. Теоретический и практический интерес имеют методы термомеханической и химико-механической модификации древесины. В результате тепловой, механической и/или химической обработки механические свойства цельной древесины могут быть приведены в соответствие с требованиями, предъявляемыми к материалу готового изделия из нее. Изучению возможности применения методов термомеханической и химико-механической модификации древесины посвящено множество работ [1–7, 9, 10, 24, 25], актуальных и в наши дни [19, 20, 36–39].

Целью работы является изучение особенностей воздействия на цельную древесину сосны обыкновенной перегретого пара при взрывном автогидролизе и последующем горячем прессовании гидролизованной древесины в композитный материал, который должен обладать улучшенными прочностными и приемлемыми гидрофобными характеристиками по сравнению с исходной древеси-

ной. Кроме того, варьирование условий баротермической обработки и горячего прессования позволит влиять на основные физико-механические показатели свойств материала и изменять их в достаточно широком диапазоне. Придание древесине новых качественных характеристик может расширить возможности ее применения в виде конструкционного материала, обеспечить использование в более нагруженных условиях с сохранением гидрофобных свойств.

Объекты и методы исследования

В работе использованы образцы цельной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – одной из основных пород, образующих древостой в хвойных и смешанных лесах, – выдержанной после рубки в течение 1 года в проветриваемом и неотапливаемом помещении. Отбор образцов выполнялся из ядровой части ствола с использованием ленточной пилы. Изготавливались пластины смешанного (полурадиального) среза с преобладанием тангенциальной составляющей. Размер исходных пластин составил $150 \times 50 \times (\sim)7$ мм с длинной стороной, взятой вдоль волокон. После вырезки образцы выдерживались в сухом помещении. Влажность образцов перед проведением баротермической обработки ~ 20 %. Оценка абсолютной влажности осуществлялась посредством высушивания контрольной группы образцов до стабилизации массы и определения разности их массы с массой в исходном состоянии по методике [11].

Образцы древесины подвергались баротермическому воздействию перегретого насыщенного водяного пара методом взрывного автогидролиза в лабораторном реакторе периодического действия, который традиционно используется для обработки предварительно измельченных лигноцеллюлозных материалов в целях получения на их основе целлюлозы, топливных гранул, биоэтанола, животных кормов и др. [28, 29, 34]. В данном случае обработке подвергались образцы цельной древесины. При этом условия обработки выбирались так, чтобы в процессе автогидролиза и последующего резкого сброса давления не происходило их фрагментирования. Температура обработки образцов составляла 200 °С, продолжительность обработки – от 0,08 до 10 мин. Фактор жесткости (R_0) процесса взрывного автогидролиза, определяется в соответствии с зависимостью [26, 32, 33, 35]:

$$R_0 = \tau e^{\frac{T-100}{14,75}},$$

где τ – продолжительность процесса, мин, $\tau = 73 \dots 13\ 200$ мин; T – температура процесса обработки, °С.

После баротермической обработки полученные образцы гидролизованной древесины подвергались сушке в естественных условиях отапливаемого помещения до комнатно-сухой степени влажности (10...18 %), определяемой после стабилизации массы.

Гидролитические процессы, происходящие в структуре растительной ткани при обработке перегретым паром, способствуют появлению в составе материала компонентов, способных вступать в реакцию с образованием прочных межмолекулярных связей. Вопросы получения композитных материалов из гидролизованного лигноцеллюлозного вещества изучались и изучаются достаточно широко [27, 30, 31]. Высушенные образцы

гидролизованной древесины сосны помещались в разборную пресс-форму и подвергались плоскостному горячему прессованию при температуре 120 °С и давлении прессования 4,0 МПа. Нагрев и прессование были проведены в целом по следующей методике. После помещения образца в пресс-форму осуществлялся ее нагрев с одновременной установкой требуемого давления. В процессе увеличения температуры поддерживалось целевое значение давления. После достижения температуры, отличающейся от целевой в меньшую сторону на 5...7 °С, нагрев прекращался, температура образца при этом продолжала расти из-за инертности системы, достигая через несколько минут целевого значения $\pm 1,5$ °С. Образец выдерживался при заданных давлении и температуре в течение 3 мин, после чего следовало снятие давления и постепенное охлаждение пресс-формы с образцом до температуры 30...35 °С. Общая продолжительность цикла обработки образцов гидролизованной древесины от момента их размещения в пресс-форме до охлаждения составляла 25...35 мин.

Поликонденсационные процессы, имеющие место при горячем прессовании гидролизованной древесины, приводят к уплотнению материала за счет появления сшитых межмолекулярных структур [23, 40]. Физико-механические свойства древесины после баротермической обработки и горячего прессования существенно отличаются от показателей исходной древесины.

Для всех образцов гидролизованной древесины, а также не подвергнутых баротермической обработке контрольных найдена плотность по методике [12]. Для образцов термодревесной композиции, полученных в результате горячего прессования гидролизованной древесины, по стандартным методикам [12, 16] определены прочность при статическом изгибе на испытательной машине, соответствующей требованиям [15], а также водопоглощение и разбухание по толщине за 24 ч. Взвешивание образцов выполнялось на лабораторных весах, отвечающих требованиям [13], с погрешностью $\pm 0,1$ %. Измерение толщины проводилось микрометром [14] с погрешностью $\pm 0,01$ мм. Все измерения осуществлены при комнатной температуре.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1, а представлена зависимость плотности образцов древесины сосны, подвергнутой баротермической обработке, от жесткости процесса. Данные образцы не подвергались горячему прессованию после гидролиза, но были предварительно высушены до влажностного содержания $\sim 10...18$ %. Прослеживается тенденция закономерного уменьшения плотности гидролизованной древесины с увеличением жесткости процесса ее обработки паром. Зависимость является убывающей по экспоненциальному закону второго порядка.

Следует отметить существенные отличия в плотности образцов древесины, гидролизованной в условиях, достаточно близких к значениям жесткости до 2000 мин. Здесь и далее некоторое увеличение плотности отдельных образцов при более высоких значениях жесткости, вероятно, следует считать результатом действия случайных факторов, обусловленных структурной неоднородностью древесной ткани подвергнутых испытаниям образцов. Даже взятые из одного ствола и в одинаковых условиях, они отличаются друг от друга по наличию и количеству внутренних дефектов, зон уплотнения, их размеру и др.

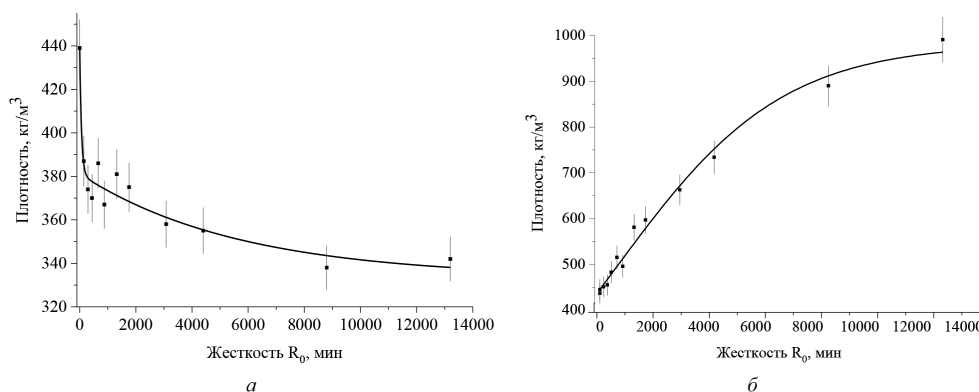


Рис. 1. Зависимость плотности от жесткости баротермической обработки: *а* – гидролизованная древесина сосны (непрессованный материал); *б* – термодревесная композиция из древесины сосны

Fig. 1. Dependence of pine samples density on rigidity factor of barothermal treatment: *a* – hydrolyzed pine wood (non-pressed material); *b* – pine thermowood composition

При этом однозначно прослеживается тенденция к уменьшению плотности при увеличении жесткости гидролиза. Представленные результаты позволяют сделать вывод, что баротермическая обработка древесины сосны при жесткости процесса 73...4400 мин приводит к значительным деструктивным изменениям в ее морфологической структуре. Гидролиз даже в мягких условиях снижает плотность древесного вещества более чем на 10 %, что свидетельствует о появлении значительного количества пор в межволоконном пространстве такого материала. Дальнейшее увеличение жесткости условий обработки сопровождается уменьшением плотности, но интенсивность этого процесса значительно снижается. Следствием является уменьшение плотности древесной ткани до 25 % по сравнению с исходной древесиной.

Горячее прессование гидролизованной древесины сопровождается ее значительным уплотнением, вызываемым размягчением компонентов древесной ткани, а также процессами химической сшивки с образованием межмолекулярных связей [23]. С увеличением жесткости условий баротермической обработки отмечается неравномерное возрастание плотности образцов получаемого материала с тенденцией к «насыщению» (рис. 1, б). Зависимость носит экспоненциальный характер и описывается экспоненциальным законом.

Из рис. 1, б видно, что горячее прессование гидролизованной древесины, полученной в условиях незначительных или умеренных значений жесткости (до 4 000...5 000 мин), приводит к практически линейному увеличению плотности термодревесного материала. Следствием дальнейшего повышения жесткости процесса является замедление темпов роста плотности с переходом к области условного «насыщения». Следует предположить, что обработка древесины при жесткости, превышающей 10 000 мин, не приведет к заметному увеличению плотности материала. Это можно объяснить тем, что баротермическая обработка вплоть до $R_0 = 4\ 000...6\ 000$ мин постепенно увеличивает количество активных групп, участвующих в поликонденсационных процессах при горячем прессовании. Морфологическая структура древесной ткани при этом существенно разрушается, о чем свидетельствует значительное изменение

плотности таких образцов непосредственно после баротермической обработки даже в мягких условиях (см. рис. 1, *a*).

В условиях, когда $R_0 < 3000$ мин, интенсивность процессов сшивки максимальна. Дальнейшее увеличение R_0 способствует интенсификации процессов деструкции лигнина, сопровождаемых деградацией древесной ткани. Однако деструктивные процессы еще не доминируют над процессами сшивки компонентов, хотя и существенно их замедляют. Подтверждением может служить характер зависимости от R_0 прочностных характеристик материала (рис. 2).

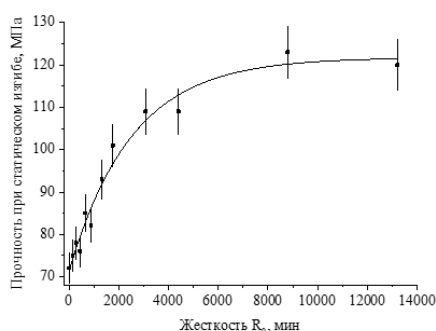


Рис. 2. Зависимость прочности при изгибе термодревесной композиции из древесины сосны от жесткости баротермической обработки

Fig. 2. Dependence of bending strength of a pine thermowood composition on rigidity factor of barothermal treatment

Аналогично плотности, при увеличении R_0 происходит повышение прочностных характеристик. Однако данная зависимость имеет несколько иной характер. Интенсивный рост прочности наблюдается приблизительно до $R_0 = 3000...4000$ мин, после чего данный показатель возрастает незначительно, в то время как плотность продолжает увеличиваться (см. рис. 1, *b*). Вероятно, что значение R_0 в $3000...4500$ мин определяет условную границу, после достижения которой количество сшитых межмолекулярных структур в материале становится близким к максимальному. Более жесткие условия обработки интенсифицируют процесс деструкции морфологической структуры древесной ткани, постепенно замедляя в ней образование новых реакционноспособных групп. На практике это означает, что баротермическая обработка древесины сосны для получения на ее основе термодревесной композиции нецелесообразна при $R_0 > 4500$ мин.

Следующим этапом стал анализ гидрофобных характеристик материала. На рис. 3 представлены показатели его водопоглощения и разбухания по толщине за 24 ч. Обе зависимости имеют сложный характер. С увеличением жесткости процесса баротермической обработки до $R_0 = 1000$ мин наблюдается резкое возрастание как водопоглощения, так и разбухания по толщине. При $R_0 = 1000...2000$ мин водопоглощение и при $R_0 \approx 3000$ мин разбухание по толщине достигают максимума, превышая аналогичные показатели для исходной древесины в 3–5 раз. Следствием дальнейшего увеличения R_0 является значительное улучшение гидрофобных показателей.

Очевидно, что гидрофобные характеристики композиционных материалов на основе древесины обусловлены прежде всего наличием пустот, количество и объем которых определяют плотность материала. Как правило, водопоглощение и разбухание подобных материалов находятся в линейной зависимости от нее [21, 22]. Однако в нашем случае этого не наблюдается (рис. 4).

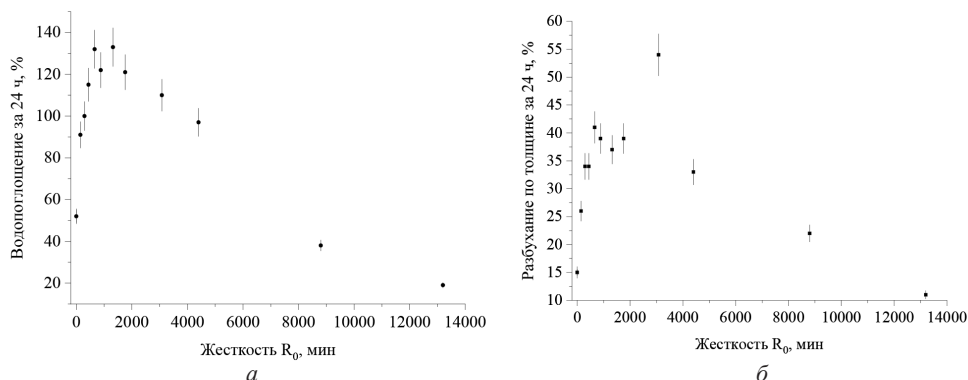


Рис. 3. Зависимость водопоглощения (а) и разбухания по толщине (б) за 24 ч термодревесной композиции из древесины сосны от жесткости баротермической обработки

Fig. 3. Dependence of water absorption (a) and thickness swelling (b) for 24 hours of a pine thermowood composition on rigidity factor of barothermal treatment

Подобное поведение материала может иметь следующее объяснение. В мягких условиях гидролитического воздействия изменения, происходящие в молекулярной структуре древесного вещества, не приводят к появлению в нем значительного количества реакционноспособных компонентов. Горячее прессование такой древесины сопровождается ее механическим уплотнением. Однако образующихся при протекании поликонденсационных процессов сшитых структур оказывается недостаточно для формирования прочной композиции, способной противостоять воздействию воды. Погруженный в воду материал начинает впитывать ее подобно первоначально сжатой губке, следствием чего и является увеличение водопоглощения и разбухания по толщине при росте плотности термодревесной композиции. Когда фактор жесткости превышает пороговое значение ($R_0 = 1500...2000$ мин), количество активных компонентов в древесине увеличивается настолько, что образующиеся при прессовании межмолекулярные связи становятся способны удерживать целостность структуры материала, препятствуя процессам водопоглощения и разбухания. Зависимость гидрофобных свойств от плотности перестает быть аномальной (правые части на рис. 4).

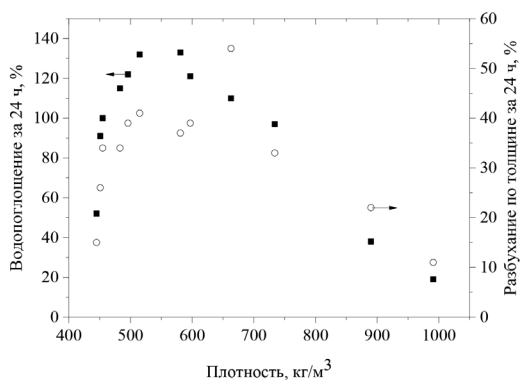


Рис. 4. Зависимость водопоглощения и разбухания по толщине за 24 ч термодревесной композиции из древесины сосны от ее плотности (■ – водопоглощение, ○ – разбухание по толщине)

Fig. 4. Dependence of water absorption and thickness swelling for 24 hours of a pine thermowood composition on its density (■ – water absorption, ○ – thickness swelling)

Характерно, что прочностные характеристики материала достигают своих максимальных значений при $R_0 > 3000$ мин.

Таким образом, баротермическая обработка древесины сосны методом взрывного автогидролиза с последующим горячим прессованием обеспечивает получение термодревесного композитного материала со значительно измененными по сравнению с исходной древесиной показателями физико-механических свойств. В процессе длительной выдержки изготовленных образцов в комнатных условиях прослеживается сохранение их стабильной формы и размеров. В условиях значительного увлажнения при погружении в водную среду отмечается существенная деформация материала по толщине, обусловленная разбуханием. Некоторые сравнительные характеристики исходной древесины сосны, а также термодревесного композитного материала, полученного на ее основе, представлены в таблице.

Сравнительные характеристики исходной древесины сосны и термодревесного композитного материала, полученного на ее основе

№	Метод обработки	Жесткость, мин	Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Прочность при статическом изгибе, МПа	Водопоглощение за 24 ч, %	Разбухание по толщине за 24 ч, %
1	Без обработки	–	20±3	435±21,8	80±4,0	44±2,4	8±0,6
2	Горячее прессование	0	14±4	445±22,2	72±3,6	52±2,9	15±1,1
3	Гидролиз, горячее прессование	146	14±4	451±22,5	75±3,8	91±5,0	26±1,8
4		293		455±22,7	78±3,9	100±5,5	34±2,4
5		440		483±24,1	76±3,8	115±6,3	34±2,4
6		660		515±25,7	85±4,3	132±7,3	41±2,9
7		880		496±24,8	82±4,1	122±6,7	39±2,7
8		1320		581±29,0	93±4,7	133±7,3	37±2,6
9		1760		597±29,9	101±5,1	121±6,7	39±2,7
10		3080		663±33,1	109±5,5	110±6,1	54±3,8
11		4400		734±36,7	109±5,5	97±5,3	33±2,3
12		8800		890±44,5	123±6,2	38±2,1	22±1,5
13		13200		991±49,6	120±6,0	19±1,0	11±0,8

Заключение

Баротермическая обработка древесины сосны в среде насыщенного пара, сопровождаемая взрывной декомпрессией системы, вызывает гидролитические и структурно-деструктивные изменения в ее ткани. При этом наблюдается тенденция к уменьшению плотности древесины с увеличением жесткости (R_0) баротермического процесса. Горячее прессование гидролизованной древесины приводит к ее значительному уплотнению, степень которого, помимо условий прессования, определяется температурой и продолжительностью баротермического воздействия. Результатом горячего прессования гидролизованной древесины сосны является получение композитного материала, плотность и прочность которого характеризуются областью условного насыщения, по до-

стижению которой существенного увеличения данных показателей с повышением R_0 не происходит. Для плотности показатель «насыщения» соответствует $R_0 \sim 8000$ мин, для прочности при изгибе ~ 3000 мин. Обнаружено ухудшение гидрофобных показателей получаемой термодревесной композиции с увеличением R_0 до ~ 2000 мин. Следствием дальнейшего роста R_0 является существенное снижение водопоглощения и разбухания по толщине, обусловленное увеличением числа межмолекулярных связей, формируемых в поликонденсационных процессах при горячем прессовании гидролизованного древесного вещества. Пропорционально повышению плотности материала происходит снижение его водопоглощения. Между данными параметрами наблюдается линейная зависимость. При $R_0 > 2500$ мин резко снижаются прочностные характеристики древесины, связанные с интенсификацией процессов термической и гидролитической деструкции, их доминированием над образованием химических связей между компонентами древесного комплекса.

Баротермическая обработка древесины сосны для получения на ее основе термодревесной композиции с оптимальными физико-механическими характеристиками целесообразна при жесткости процесса 3000...5000 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 157092 СССР, МПК В 27d. Способ изготовления, например, элементов мебели путем горячего прессования пакета: № 774921/29-14: заявл. 20.04.1962: опубл. 01.01.1963 / З.Р. Балтпурвиньш, Г.В. Берзиньш, Ф.А. Шнюцинъ, А.П. Николаев, Э.А. Микит, И.Я. Зелтынъ, М.А. Экс. [Baltpurvin'sh Z.R., Berzin' G.V., Shnyutsin' F.A., Nikolayev A.P., Mikit E.A., Zeltyn' I.Ya., Eks M.A. *A Method of Manufacturing, for Example, Furniture Items by Hot Pressing a Package*. Certificate of Authorship USSR no. SU 157092 A1, 1963].
2. А. с. 251818 СССР, МПК В 29j. Способ получения древесных пластиков: № 1132829/29-33: заявл. 13.02.1967: опубл. 06.01.1970 / Г.В. Берзиньш, М.С. Мовнин, А.И. Калниньш, Э.Я. Слагис, Н.А. Модин, Я.К. Гулбис, З.Р. Балтпурвиньш, А.З. Зиемелис. [Berzin'sh G.V., Movnin M.S., Kalnin'sh A.I., Slagis E.Ya., Modin N.A., Gulbis Ya.K., Baltpurvin'sh Z.R., Ziyemelis A.Z. *Method for Producing Wood Plastics*. Certificate of Authorship USSR no. SU 251818 A1, 1970].
3. А. с. 313675 СССР, МПК В 27m 1/02. Способ изготовления уплотненной древесины: № 1389620/29-33: заявл. 30.12.1969: опубл. 07.09.1971 / М.С. Мовнин, Н.А. Модин, А.Н. Ерошкин, А.Г. Ермолович, Г.В. Берзиньш. [Movnin M.S., Modin N.A., Eroshkin A.N., Ermolovich A.G., Berzin'sh G.V. *Method for Manufacturing Densified Wood*. Certificate of Authorship USSR no. SU 313675 A1, 1971].
4. А. с. 315610 СССР, МПК В 27m 3/04. Способ изготовления торцевой шашки: № 1397927/29-33: заявл. 05.01.1970: опубл. 01.10.1971 / М.С. Мовнин, А.Н. Ерошкин, Н.А. Модин, В.Я. Капустин, Е.И. Швец, Ю.Н. Файнгольд. [Movnin M.S., Eroshkin A.N., Modin N.A., Kapustin V.Ya., Shvets E.I., Fayngol'd Yu.N. *Method for Manufacturing a Wood Block*. Certificate of Authorship USSR no. SU 315610 A1, 1971].
5. А. с. 370050 СССР, МПК В 27m 1/02. Способ уплотнения древесины: № 1687605/29-33: заявл. 12.07.1971: опубл. 15.02.1973 / М.С. Мовнин, Н.А. Модин, А.Н. Ерошкин, Л.И. Янговский, А.Б. Израелит, М.П. Янговская. [Movnin M.S., Modin N.A., Eroshkin A.N., Yantovskiy L.I., Izrayelit A.B., Yantovskaya M.P. *Wood Densification Method*. Certificate of Authorship USSR no. SU 370050 A1, 1973].
6. А. с. 493716 СССР, МПК G 01n 25/56. Способ определения оптимальной температуры горячего прессования древесных пластиков: № 2003887/26-25: заявл.

11.03.1974; опубл. 30.11.1975 / В.В. Желдакова, В.Н. Петри. [Zheldakova V.V., Petri V.N. *Method for Determining the Optimum Temperature for Hot Pressing of Wood Plastics*. Certificate of Authorship USSR no. SU 493716 A1, 1975].

7. А. с. 931499 СССР, МПК В 44 С 1/24. Способ получения декоративного изображения на поверхности древесного изделия: № 2996524/28-12: заявл. 14.07.1980; опубл. 30.05.1982 / А.Г. Ермолович. [Ermolovich A.G. *A Method of Producing a Decorative Image on the Surface of a Wood Product*. Certificate of Authorship USSR no. SU 931499 A1, 1982].

8. Буглай В.М. Технология отделки древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 304 с. [Buglay V.M. *Technology of Wood Fashioning*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 304 p.].

9. Винник Н.И. Модифицированная древесина. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 160 с. [Vinnik N.I. *Modified Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 160 p.].

10. Винник Н.И., Корыстин Л.Н. Промышленное производство прессованной древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1964, 140 с. [Vinnik N.I., Korystin L.N. *Industrial Production of Pressed Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 140 p.].

11. ГОСТ 16483.7–71. Древесина. Методы определения влажности (с изменениями № 1–3). М.: Стандартиформ, 2006. 5 с. [State Standard. *GOST 16483.7–71. Wood. Methods for Determination of Moisture Content*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 5 p.].

12. ГОСТ 19592–80. Плиты древесноволокнистые. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1987. 15 с. [State Standard. *GOST 19592–80. Fibre Boards. Test Methods*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1987. 15 p.].

13. ГОСТ 24104–2001. Весы лабораторные. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 2002. 11 с. [State Standard. *GOST 24104–2001. Laboratory Scales. General Technical Requirements*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002. 11 p.].

14. ГОСТ 6507–90. Микрометры. Технические условия (с изменением № 1). М.: Изд-во стандартов, 2004. 21 с. [State Standard. *GOST 6507–90. Micrometers. Specifications*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2004. 21 p.].

15. ГОСТ 7855–84. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Типы. Основные параметры. Общие технические требования (с изменениями № 1, 2). М.: Изд-во стандартов, 1990. 12 с. [State Standard. *GOST 7855–84. Tensile Testing Machines and Universal Testing Machines for Static Tests of Metals and Structural Plastics. Types. Main Parameters. General Technical Requirements*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1990. 12 p.].

16. Грибенчикова А.В. Материаловедение в производстве древесных плит и пластиков. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 120 с. [Gribenchikova A.V. *Materials Science in the Production of Wood-Based Panels and Plastics*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 120 p.].

17. Леса СССР. Т. 4: Леса Урала, Сибири и Дальнего Востока / гл. ред. А.Б. Жуков. М.: Наука, 1969. 768 с. [Forests of the USSR. Vol. 4. Forests of the Urals, Siberia and the Far East. Editor-in-Chief A.B. Zhukov. Moscow, Nauka Publ., 1969. 768 p.].

18. Прието Дж., Кине Ю. Древесина. Обработка и декоративная отделка. М.: Пэйнт-медиа, 2008. 392 с. [Prieto J., Kiene J. *Holzbeschichtung: Chemie und Praxis* [Wood Coatings]. Translated from German. Moscow, Paint-Media Publ., 2008. 392 p.].

19. Просвириков Д.Б., Сафин Р.Г., Садртдинов А.Р. Технология паровзрывной обработки лигноцеллюлозных материалов: моногр. Казань: Изд-во КНИТУ, 2015. 139 с. [Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Sadrtidinov A.R. *Technology of Steam Blasting of Lignocellulosic Materials*: Monograph. Kazan, KSTU Publ., 2015. 139 p.].

20. Сафин Р.Г., Просвириков Д.Б., Тимербаев Н.Ф. Разработка технологии получения химических волокон из растительного целлюлозосодержащего сырья // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 3(375). С. 68–74. [Safin R.G., Prosvirnikov D.B., Timerbaev N.F. Development of Technology for Obtaining Chemical

Fibers from Plant Cellulose-Containing Raw Materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology], 2018, vol. 3(375), pp. 68–74.].

21. Скурыдин Ю.Г. Структура и свойства композиционных материалов, полученных из отходов древесины после взрывного гидролиза: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2000. 147 с. [Skurydin Yu.G. *Structure and Properties of Composite Materials Obtained from Wood Wastes after Explosive Hydrolysis*: Cand. Eng. Sci. Diss. Barnaul, 2000. 147 p.].

22. Скурыдина Е.М. Разработка технологии композиционных материалов на основе древесины и полимерных наполнителей: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2006. 170 с. [Skuridina E.M. *Development of the Technology of Composite Materials Based on Wood and Polymer Fillers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Barnaul, 2006. 170 p.].

23. Старцев О.В., Салин Б.Н., Скурыдин Ю.Г. Баротермический гидролиз древесины в присутствии минеральных кислот // Докл. АН. Химическая технология. 2000. Т. 370, № 5. С. 638–641. [Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermal Hydrolysis of Wood in Presence of Mineral Acids. *Doklady Akademii Nauk. Khimicheskaya tekhnologiya* [Doklady Chemistry], 2000, vol. 370, no. 5, pp. 638–641].

24. Хрулев В.М. Модифицированная древесина в строительстве. М.: Стройиздат, 1986. 112 с. [Khrulev V.M. *Modified Wood in Construction*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 112 p.].

25. Шейдин И.А., Пюдин П.Э. Технология производства древесных пластиков и их применение. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 264 с. [Sheyidin I.A., Pyudin P.E. *Wood Plastics Production Technology and Their Application*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 264 p.].

26. Abatzoglou N., Chornet E., Belkacemi K., Overend R.P. Phenomenological Kinetics of Complex Systems: The Development of a Generalized Severity Parameter and Its Application to Lignocellulosics Fractionation. *Chemical Engineering Science*, 1992, vol. 47, iss. 5, pp. 1109–1122. DOI: [10.1016/0009-2509\(92\)80235-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(92)80235-5)

27. Anglès M.N., Ferrando F., Farriol X., Salvadó J. Suitability of Steam Exploded Residual Softwood for the Production of Binderless Panels. Effect of the Pre-Treatment Severity and Lignin Addition. *Biomass and Bioenergy*, 2001, vol. 21, iss. 3, pp. 211–224. DOI: [10.1016/S0961-9534\(01\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00031-9)

28. Asada C., Sasaki C., Uto Y., Sakafuji J., Nakamura Y. Effect of Steam Explosion Pretreatment with Ultra-High Temperature and Pressure on Effective Utilization of Softwood Biomass. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, vol. 60, pp. 25–29. DOI: [10.1016/j.bej.2011.09.013](https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.09.013)

29. Ewanick S., Bura R. Hydrothermal Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Bioalcohol Production*. Ed. by K. Waldron. Oxford, Woodhead, 2010, pp. 3–23. DOI: [10.1533/9781845699611.1.3](https://doi.org/10.1533/9781845699611.1.3)

30. Focher B., Marzetti A., Beltrame P.L., Avella M. Steam Exploded Biomass for the Preparation of Conventional and Advanced Biopolymer-Based Materials. *Biomass and Bioenergy*, 1998, vol. 14, iss. 3, pp. 187–194. DOI: [10.1016/S0961-9534\(97\)10046-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10046-0)

31. Halvarsson S., Edlund H., Norgren M. Manufacture of Non-Resin Wheat Straw Fibreboards. *Industrial Crops and Products*, 2009, vol. 29, iss. 2-3, pp. 437–445. DOI: [10.1016/j.indcrop.2008.08.007](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.08.007)

32. Heitz M., Capek-Ménard E., Koeberle P.G., Gagné J., Chornet E., Overend R.P., Taylor J.D., Yu E. Fractionation of *Populus tremuloides* at the Pilot Plant Scale: Optimization of Steam Pretreatment Conditions Using the STAKE II Technology. *Bioresource Technology*, 1991, vol. 35, iss. 1, pp. 23–32. DOI: [10.1016/0960-8524\(91\)90078-x](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90078-x)

33. Heitz M., Carrasco F., Rubio M., Brown A., Chornet E., Overend R.P. Physico-Chemical Characterization of Lignocellulosic Substrates Pretreated via Autohydrolysis:

An Application to Tropical Woods. *Biomass*, 1987, vol. 13, iss. 4, pp. 255–273. DOI: [10.1016/0144-4565\(87\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0144-4565(87)90063-1)

34. Muzamal M., Jedvert K., Theliander H., Rasmuson A. Structural Changes in Spruce Wood During Different Steps of Steam Explosion Pretreatment. *Holzforschung*, 2015, vol. 69, iss. 1, pp. 61–66. DOI: [10.1515/hf-2013-0234](https://doi.org/10.1515/hf-2013-0234)

35. Overend R.P., Chornet E. Fractionation of Lignocellulosics by Steam Aqueous Pretreatments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1987, vol. 321, no. 1561, pp. 523–536. DOI: [10.1098/rsta.1987.0029](https://doi.org/10.1098/rsta.1987.0029)

36. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Akhmetshin I.R., Taimarov M.A., Timerbaev N.F. Mechanization of Continuous Production of Powdered Cellulose Technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 221, art. 012010. DOI: [10.1088/1757-899X/221/1/012010](https://doi.org/10.1088/1757-899X/221/1/012010)

37. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Zakirov S.R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 773–778. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773)

38. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Ziatdinova D.F., Timerbaev N.F., Sadrtidinov A.R. Modeling of Delignification Process of Activated Wood and Equipment for Its Implementation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 221, art. 012009. DOI: [10.1088/1757-899X/221/1/012009](https://doi.org/10.1088/1757-899X/221/1/012009)

39. Skurydin Yu.G., Skuridina E.M. Physical and Mechanical Characteristics of the Thermal-Wood Composition from Hydrolyzed Birch Wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, art. 012066. DOI: [10.1088/1755-1315/316/1/012066](https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012066)

40. Startsev O.V., Salin B.N., Skuridin Y.G., Utemesov R.M., Nasonov A.D. Physical Properties and Molecular Mobility of New Wood Composite Plastic “Thermobalite”. *Wood Science and Technology*, 1999, vol. 33, I. 1, pp. 73–83. DOI: [10.1007/s002260050100](https://doi.org/10.1007/s002260050100)

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A PINE THERMOWOOD COMPOSITION DURING BAROTHERMAL TREATMENT

Yuri G. Skurydin¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-1212-2019](https://orcid.org/0000-0002-1852-2152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1852-2152>

Elena M. Skurydina², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-4572-2021](https://orcid.org/0000-0002-1707-8846), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-8846>

Rushan G. Safin³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

Almira R. Khabibulina³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-5176-2021](https://orcid.org/0000-0002-0762-8816), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0762-8816>

¹Altai State University, prosp. Lenina, 61, Barnaul, 656049, Russian Federation; e-mail: skur@rambler.ru

²Altai State Pedagogical University, ul. Molodezhnaya, 55, Barnaul, 656031, Russian Federation; e-mail: skudem@rambler.ru

³Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation; e-mail: safin@kstu.ru

Abstract. The studies are aimed at forming ideas on the structure and properties of composite materials obtained from pine wood and the processes occurring in the structure of wood tissue. The article presents the data on the influence of the conditions of barothermal treatment of pine wood samples by the method of explosive autohydrolysis on the properties of a thermowood composition. The composite material is obtained by hot pressing. The influence on density,

strength and hydrophobic characteristics was studied. A series of samples was made under different conditions of the explosive autohydrolysis rigidity factor; at a temperature of 200 °C and the process duration from 0.08 to 10 min. All samples of composite material were obtained without the use of additional components. It was found that the increase in the hydrolysis rigidity factor leads to a decrease in the density of hydrolyzed wood from 440 to ~350 kg/m³. There is no fragmentation of wood samples with the selected processing parameters. Hot pressing of hydrolyzed wood obtained under conditions of low or moderate rigidity is accompanied by a linear increase in the density of the thermowood composite material from ~440 to 500 kg/m³. The consequence of a further increase in the rigidity factor is a slowdown in the rate of increase in the density of the composite material. The conditional boundary that determines the achievement of the maximum number of cross-linked intermolecular structures in the composite material corresponds to the rigidity factor of 3000–4500 min. More rigid processing conditions cause intensification of thermal degradation processes. The dependence of hydrophobic characteristics on the rigidity of the barothermal treatment conditions is complex. At the rigidity factor of 1000–3000 min, an extreme point is observed, before which the hydrophobic properties of the material deteriorate. Its water absorption and swelling increase from 50 to 130 % and from 15 to 54 %, respectively. The hydrophobic performance is significantly improved after reaching the extreme point. Water absorption and swelling reduce to ~20 % and ~10 %, respectively. Mild hydrolysis conditions do not result in a material with consistently high hydrophobic properties. The cross-linked structures are not enough to form a strong and water-resistant composition, and as a consequence, the hydrophobic characteristics deteriorate. Increasing the value of the hydrolysis rigidity factor increases the number of active components. Additional intermolecular bonds formed during pressing improve hydrophobic characteristics. The obtained results can be used in the creation of models of processes occurring in the structure of lignocellulose substance during explosive autohydrolysis and in the preparation of composite materials based on it. Optimal parameters of barothermal treatment for obtaining composite materials with specified physical and mechanical characteristics can be determined. Barothermal treatment of solid pine wood by explosive autohydrolysis contributes to the occurrence of chemically active components in the structure of wood tissue. Their number depends on the rigidity of the processing conditions. The properties of the resulting thermowood composition depend on the conditions of explosive autohydrolysis.

For citation: Skurydin Yu.G., Skurydina E.M., Safin R.G., Khabibulina A.R. Physical and Mechanical Characteristics of a Pine Thermowood Composition during Barothermal Treatment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 143–155. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-143-155

Keywords: wood, pine, explosive autohydrolysis, barothermal treatment, composite material, thermowood composition, water absorption, thickness swelling, density, strength.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
The authors declare that there is no conflict of interest*

Поступила 09.12.19 / Received on December 9, 2019
